

УДК 621.793.7: 533.924

- Грешта В. Л. канд. техн. наук, професор, ректор Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: greshta@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4589-6811
- Єршов А. В. д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: eav.nuzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Грабовський В. Я. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vladimirgr45@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0936-6132
- Вініченко В. С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vinic@ukr.net, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Сейдаметов С. В. старший викладач кафедри фізики, Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: stanislav.seidametov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3417-7384

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ТЕРМІЧНЕ НАПРУЖЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ

Мета роботи. Полягає у розробці методу визначення фізико-механічних характеристик, внутрішніх напружень та когезійної міцності плазмового покриття.

Методи дослідження. Експериментальні методи дослідження зразків плазмового покриття на вигін та математичні методи теорії опору матеріалів.

Отримані результати. Виконано дослідження механічних властивостей плазмового покриття ПРНХ15СР2 при випробуванні на вигін. Визначені значення сил та моментів сил пружності при вигині у залежності від деформації зразка плазмового покриття. Розраховано залежність напруження від відносної деформації покриття. Визначено модуль пружності та когезійну міцність для зовнішньої і внутрішньої поверхонь покриття. Визначено товщину шару мікротріщин, який зменшує міцність та жорсткість зовнішньої поверхні покриття.

Наукова новизна. Показано, що при визначенні механічних характеристик покриття, зчепленого з основою, виникає систематична похибка внаслідок невизначеності внутрішнього напруження у покритті. Тому для вимірювання запропоновано використання відшарованих від основи зразків, які практично позбавлені внутрішнього напруження. Для внутрішньої поверхні покриття модуль пружності і міцність децю вищі, ніж для зовнішньої. Виявлена відмінність пов'язується з наявністю градієнта температури при нанесенні покриття та розподілом залишкових напружень по товщині покриття. Визначено залежність між потужністю плазмотрона та градієнтом залишкових термічних напружень у покритті.

Практична цінність. Отримані результати мають практичну цінність для визначення умов гарантованого збереження цілісності покриття при наявності залишкових напружень та розрахунку його максимальної товщини на поверхні основи. Показано, що при зменшенні потужності плазмотрона зменшується градієнт термічних напружень і максимальне напруження на поверхні покриття. Тому рекомендовано використання дротового, а не порошкового плазмотрона, що зменшує термічні напруження удвічі.

Ключові слова: плазмове покриття, модуль пружності, механічне напруження, відносна деформація, градієнт температури.

Вступ

Економічна ефективність застосування плазмових покриттів для відновлення і зміцнення деталей машин досягається тільки при забезпеченні їх достатньої міцності, яка відповідає умові надійної роботи деталі. Міцність плазмових покриттів, що наносяться в повітряній атмосфері в кілька разів нижче міцності компактного матеріалу основи [1–3].

Помітне зниження механічної міцності покриття спостерігається при збільшенні його товщини до 1,5 мм. Однією з можливих причин розтріскування покриття можуть бути підвищення залишкових напружень при перегріванні поверхні в процесі плазмового напилення. Оскільки в покритті виникають розтягуючі залишкові термонапруження,

для оцінки працездатності важливо знати не тільки міцність зчеплення з підкладкою, але і модуль пружності і когезійну міцність, а також характер їх зміни по висоті покриття. У роботі [4–6] показано, що саме когезійна міцність покриттів стійко корелює зі швидкістю кавітаційної ерозії. Вплив інших механічних властивостей значно менший.

Для вимірювання механічних властивостей використовуються випробування на розтягнення та на вигин [7–12]. Але, при вимірюванні механічних якостей покриття, зчепленого з основою, нехтується впливом внутрішніх залишкових напружень. Справа у тому, що внутрішні напруження у покритті створюються внаслідок різниці температур та термічних деформацій і можуть складати значну частину від міцності покриття, оскільки плазмові покриття створюються в умовах екстремальних градієнтів температур покриття і основи. Температура покриття приблизно на 200 °C вище ніж температура основи. Таким чином, вказаний метод вимірів має системну похибку і потребує вдосконалення.

Для подолання вказаної системної похибки застосовано метод вимірювання механічних властивостей покриття, яке відшаровано від основи. У такому покритті відсутні термічні залишкові напруження.

Мета роботи

Метою роботи є оцінка фізико-механічних властивостей шару покриття при випробуванні на вигин і розробка рекомендацій щодо запобігання руйнування покриттів.

Методика експерименту

Процес плазмового напилення на циліндричну поверхню деталі, що обертається, показаний на рис. 1. Частинки порошку розігріваються в плазмовому струмені до температур, які істотно перевищують температуру плавлення. При струмі плазмотрона 450 А, напрузі на плазмотроні 50 В, дистанції напилювання 100 мм, витраті аргону 42 л/хв вони прилипають до шорсткої поверхні деталі, утворюючи шар покриття. Виміряна профілометром шорсткість покриття становила 40 мкм.



Рисунок 1. Нанесення порошкового покриття на плазмотроні «Метко 9МВМ»

Мікросліф покриття на рис. 2 показує наявність внутрішніх дефектів, таких як пористість і існування

оксидних шарів, як на межі з підкладкою, так і між шарами покриття. Наявність зазначених дефектів призводить до істотного зниження когезійної міцності у порівнянні з міцністю компактного металу.

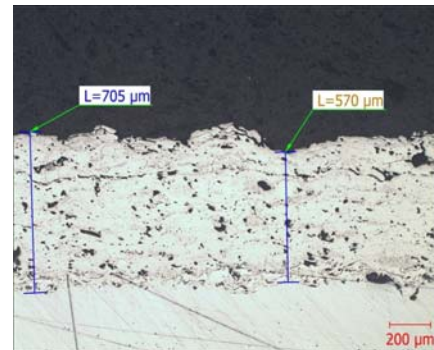


Рисунок 2. Мікроструктура покриття ПРНХ15СР2

Виконано вимірювання переміщення вільного кінця стержня в залежності від прикладеної поперечної сили. Схема прикладання сили навантаження і деформації покриття при вигині зразка при випробуванні покриття показана на рис. 3.

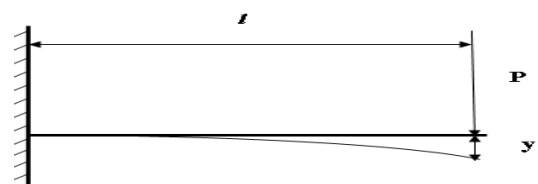


Рисунок 3. Схема навантаження і деформації покриття при вигині зразка

Залежність переміщення вільного кінця зразка від діючої поперечної сили визначається формулою Максвелла-Мора [13]:

$$y = \frac{Pl^3}{3EI}, \quad (1)$$

де P – поперечна сила, прикладена на кінці стрижня довжиною l , E – модуль пружності, $I = bh^3/12 = 3,44 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4$ – момент інерції поперечного перерізу зразка, $b = 13,1 \text{ мм}$ – ширина та $h = 1,46 \text{ мм}$ – товщина перерізу.

Використання формули (1) дозволяє визначити величину модуля пружності зразка залежно від переміщення вільного кінця:

$$E = \frac{Pl^3}{3yl}. \quad (2)$$

Для визначення максимальних нормальних напружень на поверхні зразка при консольному вигині використовувалася формула:

$$\sigma = Pl/W \quad (3)$$

де $W = bh^2/6 = 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ – момент опору прямокутного перетину зразка. Величина відносної максимальної деформації визначалася, виходячи із закону Гука:

$$\varepsilon = \sigma / E. \quad (4)$$

З урахуванням попередніх формул (1)–(3), величина максимальної відносної деформації визначається в залежності від переміщення вільного кінця стержня

$$\varepsilon = \frac{3hy}{2l^2}. \quad (5)$$

Важливо визначення механічних властивостей на зовнішньої і внутрішньої поверхні покриття. Відомо, що для тендітних матеріалів міцність на стиск в кілька разів перевищує міцність на розтягнення. До таких матеріалів відносяться і плазмові покриття. Тому руйнування покриття визначалося міцністю розтягнутих шарів. Вплив неоднорідності механічних властивостей покриття оцінювався при порівнянні результатів випробувань при розтягуванні внутрішньої і зовнішньої поверхні.

Аналіз отриманих результатів

Випробування відшарованого самофлюсуючого покриття ПРНХ15СР2 виконували шляхом вимірювання переміщення вільного кінця зразка під дією прикладеної поперечної сили. Вимірювання переміщень виконувалося за допомогою штангенциркуля. Максимальна величина переміщення при розломі зразка склала 19,5 мм. Параметри зразка: ширина зразка $13,2 \cdot 10^{-3}$ м; товщина зразка $1,46 \cdot 10^{-3}$ м; довжина 0,1 м. Матеріал покриття ПРНХ15СР2 складається в основному з 82 % нікелю і 15 % хрому, 1 % кремнію і 2 % бору. Розміри фракцій порошку 40–100 мкм. Величина модуля пружності визначалася за формулою (2). Для оцінки найбільшого розтягуючого напруження в критичному перетині в точці закріплення зразка використовувалася формула (3), а величина відносного подовження поверхневого шару в цьому перетині знаходилася за формулою (5). Результати вимірювань при розтягуванні внутрішньої поверхні покриття наведено в табл. 1.

Результати вимірювань характеристик матеріалу при розтягуванні зовнішньої поверхні покриття наведені у таблиці 2. Порівнюючи показники таблиць 1 і 2, слід зазначити, що границя міцності на розтягнення і модуль пружності зовнішньої частини покриття приблизно на 20 % нижче, ніж для внутрішньої, прилеглої до підкладки поверхні частини покриття.

Виходячи з отриманих результатів, при розтягуванні внутрішньої частини покриття, в основному виконується закон Гука, який полягає в пропорційності між напругою і відносною деформацією, аж до моменту руйнування, умови якого відповідають останньому рядку таблиці. Величина модуля пружності внутрішньої частини покриття в середньому становить $5,6 \cdot 10^{10}$ Па, що приблизно в 4 рази менше модуля пружності суцільного металу. Відносна деформація при

руйнуванні покриття складає $4,27 \cdot 10^{-3}$, що удвічі перевищує границю плинності суцільного металу. Але явище плинності при розтягуванні покриття у процесі згинання до моменту руйнування зразка не було зафіксовано.

Таблиця 1 – Характеристики деформації вигину при розтягуванні внутрішньої поверхні покриття довжиною 0,1 м

№	P, Н	M, Н·м	y, 10 ³ , м	σ , МПа	E, 10 ⁴ , МПа	ε , 10 ⁻³
1	1	0,1	2,0	21,3	4,88	0,44
2	2	0,2	3,8	42,6	5,13	0,91
3	3	0,3	5,5	63,9	5,32	1,20
4	4	0,4	7,3	85,3	5,34	1,59
5	5	0,5	9,0	106,6	5,42	1,97
6	6	0,6	10,6	127,9	5,52	2,32
7	7	0,7	12,0	149,3	5,69	2,63
8	8	0,8	13,2	170,6	5,90	2,89
9	9	0,9	15,5	191,9	5,66	3,39
10	10	1,0	17,0	213,2	5,73	3,72
11	11	1,1	19,5	234,5	5,49	4,27

Таблиця 2 – Характеристики деформації вигину при розтягуванні зовнішньої поверхні покриття довжиною 0,1 м.

№	P, Н	M, Н·м	y, 10 ³ , м	σ , МПа	E, 10 ⁴ , МПа	ε , 10 ⁻³
1	1	0,1	2,7	21,3	3,55	0,60
2	2	0,2	4,7	42,6	4,06	1,05
3	3	0,3	6,7	63,6	4,26	1,50
4	4	0,4	8,1	85,3	4,73	1,80
5	5	0,5	10,0	106,6	4,73	2,24
6	6	0,6	12,0	127,2	4,73	2,70
7	7	0,7	13,4	149,3	4,60	3,24
8	8	0,8	16,7	170,6	4,54	3,77
9	9	0,9	18,7	191,9	4,56	4,30
10	9,9	0,99	20,7	211,0	4,58	4,67

Графічний вид діаграми розтягнення для двох випадків показано на рис.4. Зазначена відмінність пояснюється, відмінністю температурних умов формування покриття і виникненням залишкових термічних напружень в ньому.

Нагріті до більш високої температури зовнішні шари покриття при охолодженні розтягуються сильніше, ніж внутрішні шари покриття, що є причиною зародження мікротріщин і зниження механічних властивостей, таких як межа міцності на розтягування і модуль пружності.

При напilenні на жорстку основу величина залишкових термічних напружень в одновимірному наближенні оцінюється за формулою:

$$\sigma_t = \alpha E \Delta t, \quad (6)$$

де $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-5}$ град.⁻¹ – коефіцієнт температурного розширення ніхрома; Δt – різниця між температурою розглянутого шару покриття і середньою температурою підкладки.

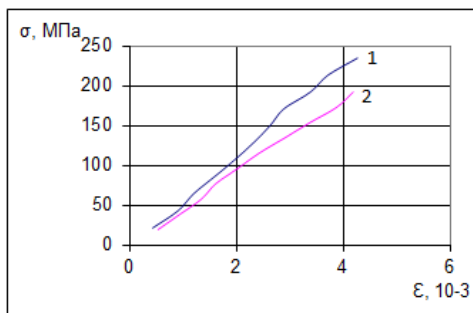


Рисунок 4. Діаграма напружень згинання відшарованого покриття при розтягуванні внутрішньої (1) і зовнішньої (2) поверхонь

Оскільки тепловий струм підводиться до зовнішньої поверхні покриття, то різниця температур Δt для зовнішнього шару буде більше, ніж для внутрішнього шару, що при охолодженні покриття і викликає додаткові напруження розтягування на його зовнішній поверхні. Згідно (6), максимальна відмінність температур між зовнішнім шаром покриття і основою, яку достатньо для появи руйнівних напружень, при використанні отриманих значень міцності і модуля пружності, становить:

$$\Delta t = \sigma / (\alpha E) = 240 \text{ }^\circ\text{C}$$

У зоні контакту покриття з підкладкою різниця температур Δt буде менше за рахунок охолоджуючого впливу підкладки. Тому залишкові термічні напруження для внутрішніх шарів покриття будуть значно меншими.

Модель зниження міцності та жорсткості покриття полягає у тому, що існує тонкий поверхневий шар руйнування покриття у якому термічні напруження перевищили межу міцності та виникли мікротріщини. Вважається, що у шарі руйнування напруження розтягування відсутні. Тоді висота навантаженого перерізу зразка буде меншою на величину шару руйнування. З формули (1) видно, що момент інерції перерізу обернено пропорційний деформації згинання і за даними табл. 1 та 2 при $P = 10$ Н має місце відношення:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{y_1}{y_2} = 0,82 \quad (7)$$

де I_1 та I_2 , y_1 та y_2 моменти інерції та деформації цілих зразків та зразків з мікротріщинами. З формули (7) маємо, що висота незруйнованого перерізу зразка з мікротріщинами визначиться як

$$\frac{h_2}{h_1} = \sqrt[3]{\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} = 0,94,$$

де h_2 та h_1 – висота незруйнованого перерізу зразка та загальна висота зразка.

Товщина шару руйнування покриття дорівнює

$$h_p = h_1 - h_2 = 0,06h_1 = 0,087 \text{ мм.}$$

Важливою характеристикою покриття є градієнт термічних напружень по висоті перерізу. Його величина залежить від висоти незруйнованої частини перерізу та від межі міцності зразка. Експериментально показано зростання термічного напруження по товщині покриття [14, 15]. Якщо знехтувати термічним напруженням у зоні контакту покриття з основою то його величину можна визначити як

$$\frac{d\sigma_T}{dh} = \frac{\sigma_B}{h_2}, \quad (8)$$

де σ_B – границя міцності покриття, яка визначається термічним напруженням на висоті незруйнованого перерізу зразка h_2 . Порівняння (6) і (8) показує, що градієнт термічних напружень є пропорційним градієнту температури та потужності теплового потоку від плазмотрону у покриття під час його нанесення на основу. Значення градієнтів термічних напружень по висоті перерізу визначають критичну товщину покриття, при якій виникають мікротріщини. Градієнти термічних напружень для порошкового та дровового плазмотронів, які майже у 2 рази відрізняються за потужністю, наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Характер залежності градієнта термічного напруження у покритті від потужності плазмотрона

Плазмотрон:	P , кВт	$\frac{d\sigma_T}{dh}$, МПа/мм
порошковий	22,5	160
дротовий [15]	14	88

Залежність градієнта термічних напружень від потужності плазмотрона приблизно визначається формулою:

$$\frac{d\sigma_T}{dh} \approx 7 \cdot P, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}},$$

де P , кВт – потужність плазмотрона. Використання дровових плазмотронів, які менш потужні ніж порошкові, має перевагу тому, що градієнт термічного напруження у покритті буде меншим. При

цьому зростає критична товщина покриття, яка при безперервному процесі напылення визначиться з (8)

$$h_2 = \frac{\sigma_B}{\frac{d\sigma_T}{dh}}$$

Таким чином, нанесення покриття з дровових матеріалів дає не тільки економію електроенергії, але й зменшення термічних напружень та підвищення якості плазмових покриттів.

Висновки

1. Показано, що при визначенні когезійної міцності покриття, зчепленого з основою, виникає системна похибка, оскільки не враховуються внутрішні напруження у покритті. В результаті випробувань на вигин відшарованого від підкладки покриття ПРНХ15СР2 отримані значення модуля пружності, границі міцності покриття і максимальної відносної деформації розтягування, як із зовнішнього, так і з внутрішньої, прилеглої до основи, сторони покриття. Виявлено, що границя міцності і модуль пружності на внутрішній поверхні покриття перевищує приблизно на 20 % відповідне значення на зовнішній поверхні покриття.

2. Причиною відмінності механічних властивостей на зовнішньої і внутрішньої поверхні покриття є існування градієнта температури по висоті покриття в процесі його нанесення, що призводить до перевищення термічними напруженнями межі міцності та створення шару мікротріщин на зовнішній поверхні покриття. Розроблено метод визначення товщини шару мікротріщин.

3. Отримані значення когезійної міцності покриття $\sigma \approx 230$ МПа, модуля пружності $E \approx 56$ ГПа при руйнівній відносній деформації $\varepsilon \approx 4,2 \cdot 10^{-3}$. Менші значення руйнівного напруження і модуля пружності відносяться до зовнішньої сторони покриття. Слід зазначити, що міцність зчеплення покриттів з основою становить лише 40-45 МПа, що в 5 разів менше когезійної міцності покриття.

4. Для попередження перегріву покриттів і виникнення руйнівних термічних деформацій, слід зменшити градієнт температури та тепловий режим напылення. При використанні дровових плазмотронів, які мають меншу потужність ніж порошкові, градієнт термічного напруження у покритті буде меншим. Це дає можливість збільшити критичну товщину покриття, при якій внутрішні напруження не призводять до виникнення мікротріщин.

Список літератури

1. Корж В. М. Нанесення покриття / В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С., Борисов, К. А. Ющенко. – К. : Аристей, 2005. – 204 с.
2. Кудинов В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.

3. Балдаев Л. Х. Современные тенденции получения газотермических покрытий / Л. Х. Балдаев, В. И. Калита // Технология металлов. – 2003. – № 2. – С. 17–20.

4. Оптимизация по критериям прочности плазменного напыления эрозионно стойких покрытий / Е. К. Соловых, Б. А. Ляшенко, Ю. В. Дмитриев, Ю. С. Борисов // Проблемы прочности. – 2008. – № 6. – С. 136–151.

5. Hobbs J. M. Experience with a 20-ks Cavitation Erosion Test / J. M. Hobbs // ASTM STP 408. – 1967. – P. 159–79.

6. Тирувенгадам А. Обобщенная теория кавитационных разрушений / А. Тирувенгадам // Тр. Америк. об-ва инженеров-механиков. Сер. Д. Техническая механика. – 1963. – 48. – № 3.

7. Определение комплекса механических характеристик газотермических покрытий / Б. А. Ляшенко, Ю. В. Дмитриев, В. Н. Богуш [и др.] // Современные достижения в области техники и применения газотермических и вакуумных покрытий. – К., 1991. – С. 90–97.

8. Методика определения механических характеристик композиции металлозащитное покрытие / Б. А. Ляшенко, С. Ю. Шаривкер, О. В. Цыгулев [и др.] // Пробл. прочности. – 1989. – № 8. – С. 113–115.

9. Дмитриев Ю.В. Методологический подход к исследованию механических характеристик материалов с покрытиями [Текст]: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 17 с.

10. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов. – К. : Наукова Думка, 1987. – 210 с.

11. Методы оценки служебных свойств защитных покрытий / Л. Х. Балдаев, И. Ф. Арутюнова, Н. А. Волосов [и др.] // Сварочное производство. – 2001. – № 9. – С. 35–38.

12. Напряжения і деформація плазмового покриття при вигині підкладки / Е. А. Зеленіна, С. В. Лоскутов, А. В. Єршов, С. Н. Мацюк // Вестник двигателестроения. – 2017. – № 1. – С. 39–42.

13. Феодосьев В. И. Соппротивление материалов. т. 2. / В. И. Феодосьев. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – 590 с.

14. Дерябкина Е. С. Влияние щеточной обработки на уровень остаточных напряжений в газопламенных покрытиях / Е. С. Дерябкина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – № 59. – С. 178–184.

15. Определение разрушающих термонапряжений цилиндрического плазменного покрытия / Е. А. Зеленіна, С. В. Лоскутов, А. В. Єршов, Шевченко В. Г. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 2. – С. 90–93.

Одержано 16.08.2023

PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS AND THERMAL STRESS OF PLASMA COVERING

- Greshta V. Ph. D., Professor, Rector, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: greshta@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4589-6811
- Yershov A. Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of the Department of Physics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: eav.nuzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Hrabovskiy V. Ph. D., Associate Professor of the Department of Physical Materials Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: vladimirgr45@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0936-6132
- Vinichenko V. Ph. D., Associate Professor of the Department of Physical Materials Science, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: vinic@ukr.net, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Seidametov S. Senior Lecturer of the Department of Physics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: stanislav.seidametov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3417-7384

Purpose. It is based on the method of determining the physical and mechanical characteristics and cohesive strength of the plasma coating.

Research methods. Experimental research methods of plasma coating specimens and mathematical methods of the theory of strength of materials. Received results. The study of the mechanical properties of the ПPHX15CP2 plasma coating during the bending test was carried out. Values of forces and moments of elastic forces during bending depending on the deformation of the plasma coating sample was determined. The dependence of the destructive stress on the relative deformation of the coating was calculated. The modulus of elasticity and strength for the outer and inner surfaces of the coating are determined.

Scientific novelty. It is shown that when determining the mechanical characteristics of the coating bonded to the base, a systematic error occurs due to the uncertainty of the internal stress in the coating. Therefore, for measurement, it is proposed to use samples peeled from the base, which are practically devoid of internal stress. For the inner surface of the coating, the modulus of elasticity and the destructive stress are rather higher than for the outer surface. The detected difference is associated with the presence of a temperature gradient during coating application and the distribution of residual stresses over the thickness of the coating. The gradient of residual thermal stresses and the maximum permissible temperature in the process of the coating deposition are determined.

Practical value. The obtained results are of practical value for determining the conditions of guaranteed preservation of the integrity of the coating in the presence of residual stresses and calculating its maximum thickness on the base surface. It is shown that when the power of the plasmatron is reduced, the thermal stress gradient and the maximum stress on the coating surface decrease. Therefore, it is recommended to use a wire instead of a powder plasmatron, which twice reduces thermal stresses by half.

Key words: plasma coating, modulus of elasticity, stress, deformation, temperature gradient.

References

1. Korzh V. M., Kuznetsov V. D., Borisov, Yu. S., Yuschenko K. A. (2005). Nanesennya pokryttya [Coating]. Kyiv, Ukrain: Aristey, 204.

2. Kudinov V. V. Bobrov G. V. (1992). Nanesenie pokrytyiy napyileniem. Teoriya, tehnologiya i oborudovanie [The application is covered by spraying. Theory, technology and equipment], Metallurgy, 432.

3. Baldaev L. H., Kalita V. I. (2003). Sovremennyye tendentsii polucheniya gazotermicheskikh pokrytyiy [Modern trends in the

production of gas-thermal coatings]. Technology of metals, 2, 17–20.

4. Solovyih E. K., Lyashenko B. A., Dmitriev Yu.V., Borisov Yu.S. (2008). Optimizatsiya po kriteriyam prochnosti plazmennogo napyileniya erozionno stoykih pokrytyiy [Optimization according to the strength criteria of plasma spraying of erosion-resistant coatings]. Durability problems, 6, 136–151.

5. Hobbs J. M. (1967). Experience with a 20-кc Cavitation Erosion Test. ASTM STP 408, 159–179.

6. Tiruvengadam A. (1963). Obobshchennaya teoriya kavitatsionnyih razrusheniy [Generalized theory of cavitation damage]. Proceedings of Amer. Society of

Mechanical Engineers. Ser. D. Technical mechanics, 3, 48.

7. Lyashenko B. A., Dmitriev Yu. V., Bogush V. N. Et al. (1991). Opredelenie kompleksa mehanicheskikh harakteristik gazotermicheskikh pokryitiy [Determination of a set of mechanical characteristics of gas-thermal coatings] Modern achievements in the field of technology and application of gas-thermal and vacuum coatings, Kyiv, 90–97.

8. Lyashenko B. A., Sharivker, S. Yu. Tsyigulev O. V. et al. (1989). Metodika opredeleniya mehanicheskikh harakteristik kompozitsii metallozaschitnoe pokryitie [Methodology for determining the mechanical characteristics of a metal protective coating composition]. Durability problems, 8, 113–115.

9. Dmitriev Yu. V. (1990). Metodologicheskii podhod k issledovaniyu mehanicheskikh harakteristik materialov s pokryitiyami [Methodological approach to studying the mechanical characteristics of coated materials]. Author's abstract. dis. ...cand. tech. Sci. Kyiv, Ukrain, 17.

10. Borisov Yu. S., Harlamov, Yu. A. (1987). Gazotermicheskie pokryitiya iz poroshkovykh materialov [Gas thermal coatings from powder materials]. Kyiv, Ukrain: Naukova Dumka, 210.

11. Baldaev L. H., Arutyunova, I. F., Volosov N. A. et al. Metodyi otsenki sluzhebnykh svoystv zaschitnykh pokryitiy [Methods for assessing the performance properties of protective coatings]. Welding production, 9, 35–38.

12. Zelenina E. A., Loskutov S. V., Ershov A. V., Matsyuk S. N. (2017). Napruzhennya i deformatsiya plazmovoogo pokryitiya pri viginl pldkladki [Stress and deformation of the plasma coating during bending of the substrate]. Engine Building Bulletin, 1, 39–42.

13. Feodosev V. I. (1999). Soprotivlenie materialov, 2. [Strength of materials t. 2.]. Moscow, Russia: MGTU im. N.E. Baumana, 590.

14. Deryabkina E. S. (2013). Vliyanie schetochnoy obrabotki na uroven ostatochnykh napryazheniy v gazoplamennykh pokryitiyah [The influence of brushing on the level of residual stresses in gas-flame coatings]. Open information and computer integrated technologies, 59, 178–184.

15. Zelenina E. A., Loskutov S. V., Ershov A. V., Shevchenko V.G. (2017). Opredelenie razrushayuschiy termonapryazheniy tsilindricheskogo plazmennogo pokryitiya. [Determination of destructive thermal stresses of a cylindrical plasma coating]. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering, 2, 90–93.